

BEEINFLUSSUNG DER ATEMMECHANIK
DURCH THERMISCHE HAUTREIZUNG
UND KÖRPERLICHE BELASTUNG

1971

Elmar Kerscher
aus
Rosenheim

AUS DEM INSTITUT FÜR MEDIZINISCHE BALNEOLOGIE UND KLIMATOLOGIE
DER UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Vorstand: Professor Dr. med. J. Lissner

BEEINFLUSSUNG DER ATEMMECHANIK
DURCH THERMISCHE HAUTREIZE UND KÖRPERLICHE BELASTUNG

Inaugural - Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde in der gesamten Medizin
erfaßt und
einer Hohen Medizinischen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von
Elmar Kerscher
aus Rosenheim

München 1971



Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter: Professor Dr. med. Drexel
Mitberichterstatter: Professor Dr. med. Lissner
Dekan: Professor Dr. med. Spann

Tag der mündlichen Prüfung: 14.12.1971

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
I. Einleitung	1
II. Physiologie der Atemmechanik	2
1. Die Lungenventilation	2
2. Die Atemmechanik	3
3. Die Steuerung der Atmung	4
III. Die Atemwiderstände	10
Die sogenannten viscösen Widerstände	10
a) Reibungs- und Deformationswiderstände der Gewebe	10
b) Strömungswiderstände in den Luftwegen ...	10
IV. Meßmethoden zur gleichzeitigen fortlaufenden Registrierung von Atemstromstärke und Alveo- lardruck	13
1. Versuchsanordnung	14
2. Praktische Ausführung der Versuche	18
V. Meßergebnisse	24
VI. Besprechung der Meßergebnisse und Diskussion	29
VII. Zusammenfassung	38
VIII. Literatur	41
IX. Lebenslauf	44



Digitized by the Internet Archive
in 2026

I. Einleitung

Beeinflussung der Atemmechanik durch thermische Hautreize und körperliche Belastung

Die üblichen klinischen Funktionsprüfungen der Lunge stellen meist eine Momentanaufnahme dar, die zahlreichen psychischen und vegetativen Einflüssen unterliegt und deshalb mit Zurückhaltung in Bezug auf ein normales oder pathologisches Ergebnis gewertet werden muß. Angst oder Unlust, Übungsman-
gel oder Übereifer werden das Ergebnis beeinflussen (1). Dieses ist um so gravierender, als bekanntlich die primären und sekundären unspezifischen Lungenkrankheiten heute nach den Ergebnissen der Gesundheitsstatistik bereits die zweite Stelle als Ursache für die Arbeitsunfähigkeit, Berentung usw. hinter den Herz- und Kreislaufferkrankungen eingenommen haben.

Neben den bisher gebräuchlichen spirometrischen und röntgenologischen Untersuchungen an der Lunge werden in den letzten Jahren immer häufiger Messungen des Strömungswiderstandes durchgeführt. In der vorliegenden Arbeit wird die Abhängigkeit der Strömungswiderstände in den Atemwegen mit der Wech-seldruckmethode nach Dirnagl (6) unter thermischen Hautrei-zen gemessen. Als Vergleichsmaßstab wurden die selben Messun-gen unter körperlicher Anstrengung und Rauchen einer Zigaret-te durchgeführt.

Neben der Atemwegswiderstandsmessung wurden die Atemfrequenz, das Atemvolumen, die Zeitdauer von Expiration wie Inspira-tion sowie die Maximalpunkte von Ex- wie Inspiration ermit-telt.

II. Physiologie der Atemmechanik

1. Die Lungenventilation:

Die Hauptfunktion des kardiovaskulären Systems besteht darin, das Kapillarnetz aller Körpergewebe mit einem Blutvolumen zu versorgen, das zu jedem Zeitpunkt dem Stoffwechselzustand der Gewebe angepaßt ist. Das kardiovaskuläre System hat die Möglichkeit, die Blutmenge entsprechend dem allgemeinen Bedarf zu erhöhen oder zu vermindern und dem besonders beanspruchten Gewebe mehr und dem weniger aktiven Gewebe weniger Blut zukommen zu lassen. Es hat jedoch keinen direkten Einfluß auf die Zusammensetzung des Blutes, also etwa auf den Gehalt an Glukose, Aminosäuren, Hormonen, Sauerstoff oder Kohlendioxyd usw. Die Hauptfunktion des respiratorischen Systems besteht darin, die O_2 - und CO_2 -Spannung in der Alveolarluft und im arteriellen Blut auf optimaler Höhe zu halten. Dies geschieht durch die Ventilation, einen zyklischen Vorgang von Ein- und Ausatmung, durch den frische Luft in die Alveolen einströmt und ein fast gleichgroßes Volumen an Alveolarluft die Lunge wieder verläßt. Bei normalen Verhältnissen wird gewöhnlich pro Atemzug drei bis fünf ml mehr O_2 aufgenommen, als CO_2 abgegeben. (3)

Die Ventilation ist ein dynamischer Vorgang. Während der Inspiration wird der Brustkorb durch die Kontraktion der Interkostalmuskulatur und des Zwerchfelles erweitert. Durch die Erweiterung wird der intrathorakale Druck (der am Ende der Expiration auch normalerweise etwas niedriger als der atmosphärische Druck ist) weiter herabgesetzt, wodurch der Gasdruck der Lunge (der normaler Weise am Ende der Expiration dem Luftdruck entspricht) auf einen subatmosphärischen Wert erniedrigt wird. Die unter Atmosphärendruck stehende Außenluft kann in die Luftwege und Alveolen, in denen der Druck erniedrigt ist, eindringen. (2)

Da der Hauptzweck der Ventilation darin besteht, das venöse Mischblut zu arterialisieren, muß durch die Ventilation in jeder Minute genau so viel O_2 in die Alveolarluft und in das Lungenkapillarblut gebracht werden, wie der Körper in dieser Zeit verbraucht. Die in der gleichen Zeit mit der Expirationsluft ausgeschiedene CO_2 -Menge muß derjenigen entsprechen, die in der Zeiteinheit durch die Stoffwechselfvorgänge in den Geweben entstehen. Die O_2 -Zufuhr pro Minute muß dem O_2 -Bedarf des Gewebes entsprechen.

2. Die Atemmechanik:

Vorbedingung des Gasaustausches ist die Ventilation der Alveolen sowie die Durchblutung der Lungenkapillaren. Die Luft strömt von einem Gebiet mit höherem Druck in Gebiete mit niedrigerem Druck. Am Ende einer Expiration, zu einem Zeitpunkt also, in dem keine Luftströmung stattfindet, ist der intraalveoläre Druck gleich dem atmosphärischen Luftdruck. Wenn Luft in die Alveolen strömen soll, muß der intraalveoläre Druck während der Inspiration niedriger sein als der atmosphärische Luftdruck. Dieses wird durch die Kontraktur der Inspirationsmuskulatur erreicht. Die Kontraktur der Atemmuskulatur während der Inspiration erzeugt die Kräfte, die benötigt werden, um folgende Widerstände zu überwinden:

1. Die elastischen Widerstände der Lunge und des Thorax
2. Die Reibungswiderstände, die während der Bewegung von Lungen- und Thoraxgewebe entstehen und
3. Den Widerstand gegen die Luftströmung in den vielen tausend engen Röhren und Röhrchen des Tracheobronchialbaumes.

Am Ende der Inspiration ist ein Teil der bei der Inspiration geleisteten Arbeit in den elastischen Geweben von

Lunge und Thorax gespeichert. Wenn die Atemmuskulatur erschlafft und auf Lunge und Thorax keine Kraft mehr ausübt, gehen die elastischen Gewebe von Lunge und Thorax wieder in ihre Ausgangslage zurück. Sind der Widerstand der nichtelastischen Gewebe und der Strömungswiderstand in den Atemwegen klein, so kehren Lunge und Thorax allein durch die elastische Kontraktion sehr schnell in ihre Ruhelage zurück, die Expiration erfolgt also rein passiv. Sind die expiratorischen Widerstände, die der Kontraktion entgegenwirken, ungewöhnlich groß, so ist für die Entleerung der Lunge eine Kontraktion (Arbeit) der Expirationsmuskeln notwendig, es sei denn, daß für die Expiration sehr viel Zeit zur Verfügung steht. (3)

3. Die Steuerung der Atmung:

Bei der Steuerung der Atmung haben wir diejenigen Mechanismen, welche zu einer koordinierten, rhythmischen Atmung führen und die rein nervöser Natur sind, von den neuro-humoralen zu unterscheiden, welche die Aufrechterhaltung einer normalen Ventilation zum Ziele haben. Wir wollen uns zunächst mit der Entstehung des Atemrhythmus befassen. Dieser wird nach den Arbeiten von Markwald (1887) und Lumsden (1929), Hess (1938), Pitts, Magoun und Ranson (1939) einerseits durch die Atemzentren im verlängerten Mark, andererseits durch die propriozeptiven Reflexe gewährleistet, welche von der Lunge ausgehen (5).

Heute unterscheidet man drei Atemzentren. Das inspiratorische Atemzentrum liegt im ventralen Teil der Formatio reticularis der Medulla oblongata. Seine Reizung bewirkt eine heftige, koordinierte Inspiration unter Beteiligung der costalen Atemmuskulatur und des Zwerchfelles. Dauerreizung hat eine anhaltende maximale Inspirationsstellung des Thorax zur Folge.

Das expiratorische Zentrum liegt im dorsalem Teil der Formatio reticularis der Medulla oblongata, jedoch etwas weiter kranial als das Inspirationszentrum. Seine Reizung bewirkt eine aktive Expiration. Diese an der Katze bestimmten Lokalisationen haben wahrscheinlich auch für den Menschen Gültigkeit, was aus den einzelnen Fällen geschlossen werden kann, die an bestimmten Atemstörungen ad exitum kamen und bei denen lokalisierte Störungen in dem betreffenden Hirnpartien autoptisch gefunden wurden (Finley).

Das pneumotaxische Zentrum liegt in der oberen Hälfte der Pons cerebri, ungefähr auf der Höhe des Colliculum inferior. Es steht sowohl mit dem inspiratorischen und expiratorischen Zentrum, als auch mit den thermoreceptiven Zentren des Hypothalamus in Verbindung.

Wenn das inspiratorische Zentrum gereizt wird, dann erfolgt auch eine Stimulierung des pneumotaxischen Zentrums, welches seinerseits das expiratorische Zentrum aktiviert, wodurch das inspiratorische Zentrum gehemmt wird. Auf diese Weise erreicht der Reflexmechanismus eine rhythmische Folge von Ein- und Ausatmung. Die descendierenden Bahnen der in- und expiratorischen Zentren stehen unter anderem mit den Kernen des Nervus phrenicus ($C_3 - C_5$), der Inter-costalnerven und der Abdominalnerven im Rückenmark in Verbindung.

Die Frage nach einer autonomen rhythmischen Aktivität der Atemzentren wurde von Coombs, Pike und Schäfer verneint. Heute wird kaum noch bezweifelt, daß wenigstens das inspiratorische Zentrum über eine spontane rhythmische Aktivität verfügt. So konnten zum Beispiel rhythmische Impulse im zentralen Phrenicus-stumpf auch nach Durchschneidung sämtlicher afferenten Bahnen gefunden werden. Adrian und Buytendesk fanden bei Kaltblütern rhythmische Entladungen des isolierten Atemzentrums, welche dieselbe Frequenz auf-

wiesen wie der Atemrhythmus der intakten Tiere. Das pneumotaxische Zentrum hingegen verfügt über keinen autonomen Rhythmus.

Die Atemzentren stehen unter dauernder Einwirkung von Impulsen, die sowohl vom Cortex als auch von der Peripherie herkommen. Unter den letzteren ist vor allem der proprioceptive Reflex von Hering und Breuer zu nennen, der von diesen Autoren erstmals 1868 beschrieben wurde. Dieser Reflex ist von zahlreichen Autoren näher untersucht worden, worüber unter anderem in den Arbeiten von Hess und Fleisch berichtet wird. In den Lungen finden sich Dehnungsrezeptoren, welche die empfangenen Reize über die Lungenfasern des Nervus vagus dem Hirnstamm zuleiten. Bei der Inspiration werden diese Dehnungsrezeptoren in zunehmendem Maße gereizt und ihr Impuls wirkt sich auf das Expirationszentrum aus. Dieses hemmt das Inspirationszentrum, was zum Stillstand der Inspiration führt. Umgekehrt reizt die Expiration - jedoch nur die forcierte - das Inspirationszentrum, wodurch das Expirationszentrum gehemmt wird, was zum Stillstand der Expiration und Einleitung der Inspiration führt. Dieser kinetischen Atemregulation nach Hering und Breuer hat Hess die tonische Atemsteuerung angegliedert. Er konnte die Bedeutung des Zwerchfelltonus und dessen Veränderung im Atemzyklus experimentell nachweisen. Die Expirationsbewegungen lösen eine Zunahme des Zwerchfelltonus aus, die zum Stillstand der Expiration führt.

Bei der Inspiration tritt dagegen eine zunehmende Tonusminderung dieses Muskels auf, welche schließlich den Stillstand der Einatmung bewirkt. Diese vom Vagus gesteuerten Reflexe regulieren die Tonisierung des Zwerchfelles in Abhängigkeit vom Lungenvolumen. Bucher legte dar, daß die Befunde von Hering und Breuer einerseits, sowie von Hess andererseits keine Alternative darstellen, sondern durchaus nebeneinander bestehen können.

Die Atemzentren stehen auch noch unter Einflüssen, die von den höheren Zentren herrühren. Die willentliche Beeinflussung der Atmung (Hyperpnoe, Apnoe) und die emotionelle Hyperventilation sind bekannt. Nicht nur der Cortex cerebri, sondern auch die Zentren des Hypothalamus wirken auf die Atmung ein, wobei besonders an die fieberbedingte Hyperventilation erinnert sei.

Wird der Hering-Breuer'sche Reflex durch Unterbrechung der beiderseitigen Vagi ausgeschaltet, dann verlangsamt und vertieft sich die Atmung, ohne daß sich aber die alveoläre Ventilation und damit die Atemgase im arteriellen Blut ändern. Durchschneidet man außerdem noch den Hirnstamm oberhalb der Pons cerebri, wodurch die medullären Zentren vom pneumotaktischen getrennt werden, dann resultiert nach Markwald eine schwere Störung der Atembewegung. Man beobachtet unter diesen Umständen eine tonisch verlängerte Inspiration, die mehrere Sekunden lang dauert. Wenn bei Durchtrennung des Hirnstammes die Vagi intakt gelassen werden, dann fehlen die Inspirationskrämpfe und die Atmung bleibt rhythmisch (Stella, Pitts und Mitarbeiter). Man muß aber annehmen, daß das Inspirationszentrum unter der doppelten Kontrolle des pneumotaktischen Zentrums und der Vagusimpulse steht, welche letztere von den Dehnungsreceptoren der Lunge herrühren. Die autonomen Impulse des Inspirationszentrums werden durch diesen Mechanismus in einen rhythmischen Wechsel zwischen Ein- und Ausatmung umgewandelt. Jeder der beiden genannten Hemm-Mechanismen genügt allein, um eine rhythmische Atmung zu gewährleisten. Im normalen Ruhezustand beschränkt sich das Expirationszentrum darauf, lediglich das Inspirationszentrum zu hemmen, sodaß die Ausatmung passiv durch die Schwerkraft und die Elastizität der Lunge und des Thorax erfolgt. Bei Hyperventilation und besonders während der Körperarbeit beeinflusst das Expirationszentrum aktiv die Abdominalmuskeln und Mm intercostales interni. Die besprochenen Mechanismen sorgen für ein gere-

geltas Wechselspiel von Aus- und Einatmung. Die Regulierung der Ventilation wird durch eine Steuerung der Aktivität des Inspirationszentrums hervorgerufen, welche zu einer Expansion des Thorax führt. Bei zunehmender Hyperventilation kommt es auch zu einer aktiven Expiration unter Beteiligung der Ausatemmuskulatur. Die Regulation der Ventilation kommt durch das komplexe Zusammenspiel einer Reihe von Receptorensystemen zustande. Neben zwei Gruppen von Chemoreceptoren wirken auch Thermoreceptoren bei der Anpassung der Atmung an die verschiedenen Bedingungen der Umwelt und des Organismus mit.

Sowohl die bulbären Zentren als auch die peripheren Chemoreceptoren sind auf gewisse chemische Reize empfindlich. Die in der Medulla oblongata lokalisierten Atemzentren reagieren in erster Linie auf Änderungen des pH und der Kohlensäurespannung im Hirn und Kapillarblut. Eine Erhöhung der Kohlensäurespannung oder eine Senkung des pH lösen Hyperventilation aus, mit dem Ziel, durch Ausscheidung der Kohlensäure das Saure-Basen-Gleichgewicht auszubalancieren. Umgekehrt bewirkt eine Abnahme der Ventilation eine Retention der Kohlensäure. Diese Atemzentren sind jedoch unempfindlich gegenüber einer mäßigen Abnahme der Sauerstoffspannung, während sie bei einer schweren Hypoxämie in ihrer Aktivität gehemmt werden.

Die peripheren Chemoreceptoren liegen im Glomus caroticum und Glomus aorticum. Diese Receptoren sind vor allem auf Änderungen der Sauerstoffspannung empfindlich, während ihre Ansprechbarkeit auf Kohlensäure und pH weniger ausgeprägt ist. Das Glomus caroticum führt seine Impulse durch den Nervus glossopharyngeus und das Glomus aorticum durch den Nervus vagus den bulbären Zentren zu. Bei arteriellen Sauerstoffspannungen bis hinunter auf 80 mm Hg spielen diese Chemoreceptoren nur eine untergeordnete Rolle. Nach Loeschke beträgt der Impulsanteil dieser Chemoreceptoren in

Ruhe normalerweise am Gesamtminutenvolumen nur etwa 12 - 14 %. Sinkt die Sauerstoffspannung unter 80 mm Hg, dann lösen sie eine Hyperventilation aus mit dem Ziel der Erhöhung der alveolären Sauerstoffspannung. Diese peripheren Rezeptoren sind übrigens auch die Ansatzstellen für die Wirkung der atmungssteigernden Mittel wie Lobelin oder Coramin. Die Steigerung der Atmung bei der Arbeit, die Hyperpnoe kann mit der Änderung der arteriellen Blutgase nicht geklärt werden, denn bei leichter Arbeit ändert sich die Sauerstoff-Kohlensäure-Spannung und pH im arteriellen Blut gegenüber dem Ruhezustand nicht. Es wurden deshalb noch weitere Rezeptoren in den Muskeln postuliert, deren Existenz aber bis heute nicht eindeutig nachgewiesen werden konnte.

Auch bei den atemwirksamen Thermorezeptoren unterscheidet man zwei Gruppen, nämlich die zentralen im Hypothalamus und die peripheren, die vornehmlich in der Haut gelegen sind. Während die zentralen Rezeptoren vor allem auf Änderung der Bluttemperatur reagieren, stehen die peripheren mit der Umwelttemperatur in Beziehung. Relativ gut bekannt sind die Rezeptoren der Rückenhaut in der Gegend der unteren Lungengrenze. Bei Einatmung im kalten Wasser kommt es zu tiefen reflektorischen Inspirationen, die von einem tiefen Atemstillstand gefolgt sind. Bei Muskelarbeit steigt die O_2 -Aufnahme ganz erheblich über den Wert des Basalstoffwechsels. Nun ist aber schon lange bekannt, daß zu Beginn der Muskelarbeit mehr O_2 gebraucht wird als im Muskel zur Verfügung steht. Es wird also zunächst auf anaerobem Wege Energie geliefert und erst wenn Atmung und Blutzirkulation entsprechend beschleunigt sind, kann der O_2 -Verbrauch bis zu gewissen Grenzen fortlaufend durch die O_2 -Aufnahme gedeckt werden. Zu Beginn der Arbeit entsteht also ein O_2 -Defizit, das während oder nach Beendigung der Arbeit abgetragen werden muß. Die über den Grundumsatz hinausgehende O_2 -Aufnahme nach Beendigung der Arbeit wird O_2 -Schuld ge-

nannt. Die O_2 -Schuld ist nun aber nicht gleich dem Defizit, sondern beträgt bis zur mittleren Leistung etwa das Doppelte, weil die anaeroben Prozesse nur den halben Wirkungsgrad der Aeroben haben.

III. Atemwiderstände:

Die sogenannten viskösen Widerstände: (6)

Im Gegensatz zu den elastischen Widerständen sind die übrigen Widerstände eine Funktion der Atemgeschwindigkeit, also der Zeit. Hierunter sind zu verstehen:

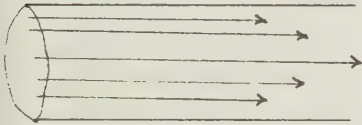
- a) Reibungs- und Deformationswiderstände der Gewebe
- b) Strömungswiderstände in den Luftwegen.

Reibungs- und Deformationswiderstände sind bedingt durch die Bewegungen der extra- und intrapulmonalen Gewebe während der Atmung: knöchernes Thoraxskelett, Thoraxwand, Baueingeweide usw. Der Widerstand ist null bei Beginn der Inspiration, erreicht sein Maximum während der größten Atemstromgeschwindigkeit, etwa in der Mitte der Inspiration und geht gegen Ende der Inspiration wieder gegen null. Am Ende der Inspiration ist also der Reibungswiderstand null, während der elastische Widerstand seinen Maximalwert im Atemzyklus erreicht. Bei der Expiration ist der gleiche Reibungswiderstand zu überwinden wie bei der Inspiration.

Der Strömungswiderstand in den Luftwegen:

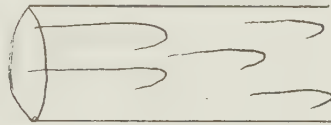
Die zur Bewegung des Luftstromes erforderliche Kraft dient zur Überwindung der inneren Reibung des strömenden Gases und der Reibung zwischen Tracheobronchialbaum und Atemgas. Diese Kraft ist die Druckdifferenz zwischen Außenluft und Alveolen. Der Strömungswiderstand hängt ab von dem Radius der durchströmten Röhre, der Strömungsgeschwindigkeit und der Art der Strömung. Man unterscheidet laminare und tur-

bulente Strömung. Die laminare Strömung kann man sich so vorstellen, daß verschiedene ko-axiale Gasschichten aneinander vorbeigleiten, wobei die wandnahen Schichten gegenüber den zentralen zurückbleiben, da sie zueinander innere Reibung erfahren. Die Druckdifferenz, die eine laminare Strömung erzeugt, ist proportional dem Stromzeitvolumen (Volumengeschwindigkeit) $P = V \times K_1$. K_1 ist proportional der Viscosität des Gases (jedoch unabhängig von der Gasdichte), der Rohrlänge und umgekehrt proportional der vierten Potenz des Radius des Rohres. Bei einer Verminderung des Rohrquerschnittes auf die Hälfte muß also die Druckdifferenz auf das 16 fache gesteigert werden.



$$P = K_1 \cdot V$$

laminare Strömung



$$P = K_2 \cdot V^2$$

turbulente Strömung

Turbulente Strömung tritt in geraden, glattwandigen Röhren erst bei höherer Strömungsgeschwindigkeit auf. Da im Tracheobronchialbaum eine Vielzahl von Verzweigungen besteht, sind zumindest lokale Turbulenzen auch bei ruhiger Atmung vorhanden. Bei großer Atemstromgeschwindigkeit, wie bei Belastung oder bei Bestimmung des Atemgrenzwertes kommt es zu überwiegend turbulenter Strömung. Die zur Überwindung des Strömungswiderstandes bei turbulenter Strömung erforderliche Druckdifferenz ist proportional dem Quadrat der Volumengeschwindigkeit. $P = V^2 \times K_2$. Hier ist K_2 unter anderem abhängig von der Gasdichte, nicht aber von der Viscosität. Die Größe der elastischen und Gewebswiderstände, gegen die Atemarbeit geleistet werden muß, sind besonders unter pathologischen Bedingungen von der Dehnungslage abhängig.

Rohrer (7) hat sich als erster damit beschäftigt, die Strömungswiderstände in den Atemwegen zu analysieren. An Modellen, Tieren und menschlichen Leichen bestimmte er durch exakte Ausmessungen die erforderlichen Größen zur Bestimmung des alveolaren Druckes. Die von ihm untersuchten Faktoren, welche für die Größe des Widerstandes bestimmend sind, wurden von Neergard und Wirz (8) sowie Vuilleumier (9) und anderen bestätigt und ergänzt. Rohrer's theoretische Untersuchungen der Strömungsverhältnisse zeigten, daß der Strömungswiderstand in den oberen Luftwegen erheblich von der Luftgeschwindigkeit abhängt, während er in den unteren Luftwegen nur wenig hiervon beeinflusst wird, da die Luft in den oberen Luftwegen stärker verwirbelt wird, in den feineren Verzweigungen dagegen fast laminar strömt. Landahl (10) fand, daß die Bronchien zweiter und dritter Ordnung ganz wesentlich höhere Strömungswiderstände, als die anderen Abschnitte (Mund, Pharynx, Trachea, Bronchien erster Ordnung) aufweisen. Sie machen etwa 75 % des Gesamtwiderstandes aus. Der Atemwiderstand läßt sich aus dem Alveolardruck durch Strömungsgeschwindigkeit berechnen. Nach dem Poisseuilleschen Gesetz ist bei laminarer Strömung der Widerstand umgekehrt proportional der vierten Potenz des Rohrdurchmessers.

$$W = \frac{P}{V}$$

$$P = \frac{8 \cdot l \cdot V}{r^4}$$

$$V = \frac{r^4 \cdot P}{8 \cdot l}$$

V = Volumengeschwindigkeit

r = Rohrradius

l = Rohrlänge

P = Druckgefälle

= Viskosität

W = Widerstand

Schon sehr kleine Durchschnittsänderungen, wie sie durch die Bronchialmuskulatur, aber auch durch Sekretauflagerungen oder Schleimhautschwellungen leicht hervorgerufen wer-

den, wirken sich beträchtlich auf den Widerstand der betroffenen Zweige aus. Die Messung des Strömungswiderstandes in den unteren Luftwegen konnte daher als besonders empfindlicher Indikator für die Weite der Bronchien und ihre Veränderungen dienen. Eine isolierte Bestimmung ist allerdings am Lebenden nicht möglich, dagegen gibt es mehrere Möglichkeiten den Gesamtwiderstand zu bestimmen, der aus der Widerstandssumme aller Abschnitte der Luftwege resultiert. Aus diesem Gesamtwiderstand der Atemwege kann man in gewissen Fehlergrenzen auf die Weite der Bronchien in den unteren Luftwegen schließen. In den oberen Luftwegen sind die individuellen und zeitlichen Querschnittsunterschiede verhältnismäßig gering, außerdem reagiert eine verwirbelte Strömung hierauf nicht so stark. Lediglich die Stimmritze kann den Widerstand beeinflussen. Nach Vuilleumier (11) scheint ihr Einfluß in sehr engen Grenzen zu bleiben, da unter normalen Versuchsbedingungen die Stimmritze automatisch in Optimalstellung gehalten wird.

Die Berechnung des Strömungswiderstandes setzt die Kenntnis des Alveolardruckes P_{alv} und der Atemstromstärke i voraus. Die Atemstromstärke ist leicht meßbar, die Ermittlung des Alveolardruckes hingegen ist mit Schwierigkeiten verbunden.

IV. Meßmethode zur gleichzeitigen fortlaufenden Registrierung von Atemstromstärke und Alveolardruck (12):

Zur Messung der Atemwiderstände in den Atemwegen des Menschen wurde eine Methode entwickelt, um den Alveolardruck indirekt zu messen und gleichzeitig dabei die Atemstromstärke fortlaufend zu registrieren. Man bediente sich dabei folgenden Prinzips:
der Druckausgleich zwischen Alveolen und Mund kommt bei Ver

schluß der Atemwege innerhalb einiger tausendstel Sekunden zustande, da dann der strömungsbedingte Druckabfall zwischen Alveolargebiet und Mundöffnung wegfällt und es nur der Verschiebung einer sehr kleinen Luftmenge von der Größenordnung 1 ccm bedarf, um den Ausgleich herbeizuführen. Im Gesamtbereich der Lunge und der Atemwege herrscht nun der gleiche Druck. Dieser von außen leicht zu messende Druck läßt sich aber nur dann für eine Bestimmung des Atemwiderstandes verwenden, wenn er gleich oder wenigstens proportional dem bei einer bestimmten Strömungsgeschwindigkeit der freien Atmung sich einstellenden Alveolardruck ist. Diese Bedingung kann dadurch erreicht werden, daß von freier Atmung möglichst plötzlich auf Verschußatmung umgestellt wird. Alveolardruck und Atemstromstärke werden dann nicht streng gleichzeitig, sondern kurz hintereinander gemessen. Die Atemstromstärke wird an einem Pneumotachographen (14) unmittelbar vor dem Verschuß, der Alveolardruck an einem schnellreagierenden Manometer gleich anschließend abgelesen.

1. Versuchsanordnung:

Die Atemluft wird zur Registrierung der Atemgeschwindigkeit durch einen Fleisch'en Pneumotachographen geleitet. Das Gerät beruht auf dem Pouiseuille'schen Gesetz, nach dem die Strömungsgeschwindigkeit bei laminarer Strömung durch ein starres Rohr proportional der Druckdifferenz pro Längeneinheit ist. Laminare Strömung wird erreicht durch ein System vieler paralleler Rohre, die an einer Druckdifferenzkapsel mit Spiegel angeschlossen sind. Die Ausschläge werden durch einen dadurch abgelenkten Lichtstrahl registriert. Der Druck im Pneumotachographen kann durch eine genügend trägheitsarme Vorrichtung zum Beispiel eine Frank'sche Kapsel mit optischer Schreibung registriert werden. Die Bedingung der laminaren Strömung läßt sich außer dem beschriebenen Röhrensystem auch durch Verwendung sehr feinmaschiger Siebe erreichen (15). Im Augenblick der Luftunter-

brechung zeigt die Verschlußdruckkurve einen steilen Anstieg bzw. Abfall, je nachdem der Verschluß während der Expiration- oder Inspirationsphase erfolgt. Dieser steile Kurvenanstieg bzw. -abfall entspricht dem Vorgang des Druckausgleiches. Sobald er beendet ist, geht die Kurve in einen flachen Verlauf über. Der an der Knickstelle angezeigte Druck entspricht dem Alveolardruck, wenn die Registrierung genügend trägheitsarm ist.

Vuilleumier (16) baute später diese Verschlußdruckmethode aus, überprüfte sie und fand anhand von Modellversuchen, daß bei plötzlichem Verschluß der Atemwege ein Druckausgleich zwischen Alveolen und Mundhöhle zustande kommt. Er vereinfachte diese Methode vor allem dadurch, daß eine einzige Frank'sche Kapsel eine doppelte Aufgabe erfüllt. Solange der Verschluß der Atemluft offen ist, wird der Druckabfall am Widerstand des Pneumotachographen registriert. Er ist der Strömungsgeschwindigkeit proportional. Bei Verschluß des Pneumotachographen wird durch die Frank'sche Kapsel der Alveolardruck zur Registrierung übertragen. Wiederum entspricht der am Knick zwischen dem steilen Kurvenanstieg und dem flachen Kurvenverlauf annähernd dem Alveolardruck. Die Berechnung des Atemwiderstandes ergibt sich aus dem Quotienten Alveolardruck : Strömungsgeschwindigkeit, die kurz vor der Unterbrechung gemessen wird. Bei dieser Verschlußdruckmethode ist nachteilig, daß bei völliger Unterbrechung trotz kurzer Dauer im Atemmechanismus ein gewisser reflektorischer Druck und Radiusveränderungen der Atemwege auftreten. Das Prinzip der Weiterentwicklung der Verschlußdruckmethode nach Vuilleumier (22) von Dirnagl (6) zur unblutigen Messung des Atemwiderstandes mit höherer Auswertgenauigkeit bei geringerer Störung des normalen Atemverlaufes beruht darauf, daß zwei verschieden große äußere Atemwiderstände im raschen Wechsel dem inneren Atemwiderstand hinzugefügt werden. Aus den Druckänderungen des Widerstandswechsel lassen sich rechnerisch der Alveolardruck und der Atemwiderstand erfassen.

An Stelle der vollständigen Unterbrechung des Atemluftstromes tritt eine kurzfristige Erhöhung des Strömungswiderstandes in dem auch bei der Verschußdruckmethode vorhandenen Pneumotachographen. Diese äußere Widerstandserhöhung wird durch zwei alternierend eingeschaltete Siebwiderstände erreicht. Durch die Verwendung zweier feinmaschiger Siebe wird die Turbulenz der Atemströmung vermieden. Dadurch werden die Widerstandswerte W_1 und W_2 von der Atemstromstärke unabhängig gemacht. Bei dem hier verwendeten Universal-Widerstands-Meßgerät konnte diese Bedingung für alle bei normaler Atmung vorhandenen Atemstromstärken weitgehend erfüllt werden. Die beiden Siebwiderstände sind am Anfang und Ende eines Hohlzylinders montiert, der seitliche Längsschlitze aufweist. Dieser Zylinder ist in einen ebensolchen eingepaßt. Die beiden Zylinder können nun derart gegeneinander verschoben werden, daß sowohl die Schlitze als auch die Metallbrücken zur Deckung gelangen. Im ersten Fall wird nur der Widerstand W_1 am Mund gemessen (Schlitze offen), im zweiten Fall wird der Widerstandswert $W_1 + W_2$ gemessen (Schlitze geschlossen).

Eine fortlaufende Messung des Atemwiderstandes nach der Wechseldruckmethode wird durch ein elektromagnetisch gesteuertes Öffnen und Schließen der Schlitze gewährleistet. Die Atemluft wird vor dem ersten Siebwiderstand mittels einer Heizspirale gleichmäßig erwärmt, um eine störende Kondensatbildung in den Sieben zu vermeiden. Die Meßwiderstände W_1 und W_2 enthalten äußerst feinmaschige Siebe aus V2A-Stahldrähten, die je nach Meßbereich bis zu ca. 8 Mill. Maschen aufweisen. Durch die Aufteilung des Atemluftstromes in so viele Teilströme wird in den einzelnen Maschen eine laminare Strömungsform und damit Proportionalität zwischen Stromstärke und Druckabfall erreicht. Dieser wird in einem empfindlichen Differentialdruckwandler in elek-

trische Spannung umgewandelt. Die kurzfristige, etwa $1/10$ Sekunden dauernde, durch Magnettätigkeit ausgelöste Erhöhung des Meßwiderstandes erlaubt, ein Pneumotachogramm mit angesetzten Druckzacken zu schreiben, deren Höhe zur Berechnung des inneren Strömungswiderstandes in den Atemwegen herangezogen werden kann.

2. Praktische Ausführung der Versuche:

Die Versuche wurden nach der Wechseldruckmethode mit einem Pneumotachographen nach Dirnagl bei 10 gesunden, 25- bis 28 Jahre alten Personen durchgeführt. Dabei wurde jede Versuchsperson je 3 Versuchsreihen unterworfen. Jede Versuchsreihe besteht aus 6 Behandlungen.

1. Reihe: 1. Normale Atmung (stehend)
2. Warme Dusche (Ganzkörperdusche)
3. Kalte Dusche (" ")
4. Kälteschock (Eispackung im Bereich von C 2-5)
5. Anstrengung (Kniebeugen oder Liegestützen bis zu einer individuell verschiedenen körperlichen Vollbelastung)
6. Nikotingenuß (bei Rauchern intensives Inhalieren einer Filterzigarette).

2. Reihe: 1. Normale Atmung
2. Kalte Dusche
3. Warme Dusche
4. Anstrengung
5. Kälteschock
6. Nikotingenuß

Drei Versuchsreihen wurden deshalb durchgeführt, um eventuell auftretende Veränderungen durch vorhergehende Behandlungen nach Möglichkeit auszuschalten.

3. Reihe: 1. Normale Atmung
2. Kälteschock
3. Warme Dusche
4. Anstrengung
5. Kalte Dusche
6. Nikotingenuß

In allen drei Reihen wurde die Behandlung "Rauchen" an das Ende der Versuchsreihe gestellt, da bekanntlich nach Rauchen eine 20-30 Minuten lange Atemwiderstandserhöhung auftritt.

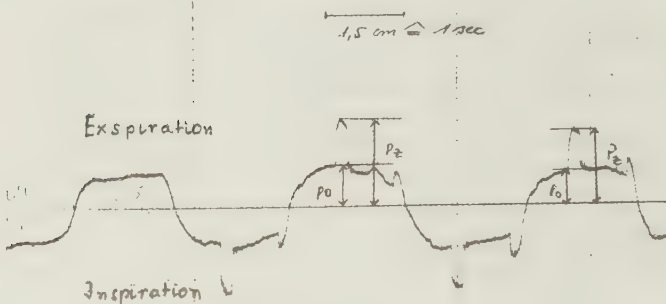
Aus den Pneumotachogrammkurven jeder Behandlung wurden

1. Atemwiderstand
2. Atemfrequenz
3. Lage des expiratorischen Maximalpunktes in der Kurve
4. Lage des inspiratorischen Maximalpunktes in der Kurve
5. Atemvolumenverhältnis
6. Dauer der Expiration
7. Dauer der Inspiration

ermittelt.

ATEMWIDERSTANDSBERECHNUNG

Die nach Dirnagl (19) modifizierte Wechseldruckmethode lieferte folgende Pneumotachogrammkurven:



Das Prinzip der Wechseldruckmethode besteht darin, daß 2 verschieden große äußere Atemwiderstände

$$R_1 = 0,192 \frac{\text{mm H}_2\text{O}}{\text{l/min.}} \quad \text{und} \quad R_2 = 0,284 \frac{\text{mm H}_2\text{O}}{\text{l/min.}}$$

im raschen Wechsel (in jeder Atemphase 3-4 mal) dem inneren Atemwiderstand hinzugefügt werden. Aus den Druckänderungen bei Widerstandswechsel lassen sich rechnerisch der Alveolardruck und der Atemwiderstand erfassen. Abb. 2 vereinfacht das Schema der Atemwege zur Erläuterung und quantitativen Analyse der Druck- und Strömungsverhältnisse.

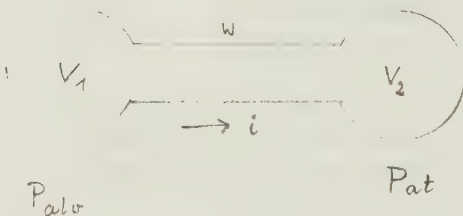


Abb. 2

V_1 stellt das Volumen der Alveolarräume, einschließlich der hiermit ohne wesentliche Strömungswiderstände verbundenen Terminalbronchiolen und der Bronchien vierter Ordnung dar.

V_2 bedeutet das Volumen von Mund, Pharynx und Bronchien erster Ordnung.

Zwischen V_1 und V_2 besteht eine Verbindung über den Strömungswiderstand, entsprechend dem weitgehend in den Bronchien zweiter und dritter Ordnung konzentrierten Gesamtwiderstand der Atemwege.

V_2 ist praktisch widerstandslos mit der Außenwelt verbunden, hier haben wir also Atmosphärendruck $P_{at.}$, während in V_1 der jeweilige Alveolardruck $P_{alv.}$ herrscht. Der Druckunterschied $P_{alv.} - P_{at.}$ bedingt das Fließen des Atemstromes i , und zwar ist i proportional $P_{alv.}$ und umgekehrt proportional der Größe von W . Hieraus erfolgt die dem Ohmschen Gesetz der Elektrotechnik analoge Beziehung

$$W = \frac{P_{alv.}}{i} \quad (2)$$

Gleichung (2) stellt die Grundlage der Meßmethode für den Atemwiderstand dar. Der innere Atemwiderstand W_i errechnet sich aus den Druckablesungen vor (p_o) und nach (p_z) der Widerstandsumschaltung, sowie aus der Größe der beiden getrennt oder kombiniert eingeschalteten Pneumotachographenwiderstände (W_1, W_2) nach der in (2) abgeleiteten Berechnung.

$$W_i = \frac{W_1 \times W_2 (p_z - p_o)}{p_z \times W_2 - p_o W_1} \quad (3)$$

Es ist jedoch nicht notwendig, den Atemwiderstand nach dieser unbequem zu handhabenden Gleichung zu berechnen, da man für das Gerät eine Eichkurve aufstellen kann, aus der für alle errechneten Werte des Verhältnisses $V = \frac{p_z}{p_o}$ der zugehörige innere Atemwiderstand abgelesen werden kann.

Eichkurve: (siehe Seite 21a)

Eichkurve

25.2.19

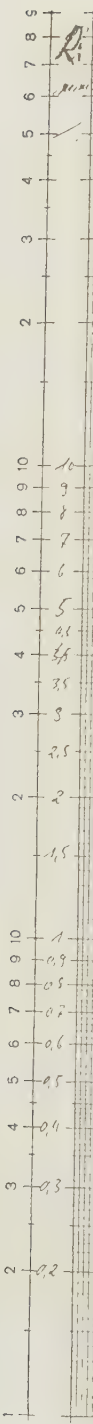
(R_1, R_2)

$$V = A \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

$$V = \frac{P_2}{P_0}$$

$$R_1 = 9.19$$

$$R_2 = 9.28$$



BERECHNUNG DER ATEMDAUER IN SEKUNDEN

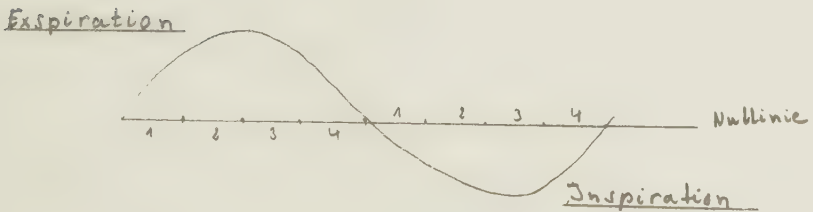
Der verwendete Schreiber zeichnete mit einer Geschwindigkeit von 1,5 cm/sek auf. Die Abmessung der Strecke auf der Nulllinie von einem Schnittpunkt der Inspirationskurve mit der Nulllinie bis zum nächsten Schnittpunkt der darauffolgenden Inspirationskurve mit der Nulllinie ergibt durch Dividieren mit 1,5 die Atemdauer in Sekunden.

Atemdauer = Expirationsdauer + Inspirationsdauer.

Atemfrequenz = 60 sek. : Atemdauer in Sekunden.

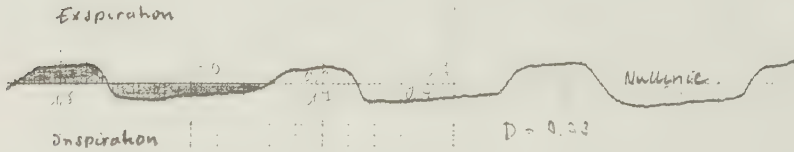
LAG DES KURVENMAXIMUMS BEI EX- UND INSPIRATION

Dabei wurde jede Ex- sowie Inspirationskurve auf der Nulllinie in 4 gleiche Abstände eingeteilt und die Lage des Kurvenmaximumpunktes auf die Nulllinie projiziert und ihre Lage in den jeweiligen Nullpunktabschnitten bestimmt.



ATEMVOLUMENBERECHNUNG

Die Fläche der Ex- wie Inspirationskurven (Flächen zwischen geschriebener Pneumotachogrammkurve und Null-Linie) wurde mit einem Planimeter in Noniuseinheiten bestimmt.



$$0,1 \text{ Noniuseinheit} = 20 \text{ mm}^2$$

DAUER DER IN- SOWIE EXPIRATION

Abmessung wie bei der Atemfrequenz.

1,5 cm auf der Null-Linie = 1 sek.

V. MESSERGEBNISSE

Für die Durchführung der Versuche mit der Wechseldruckmethode nach Dirnagl (5, 6) wurden am Institut für medizinische Balneologie und Klimatologie der Universität München an zehn gesunden jungen Personen im Alter von 20 bis 28 Jahren Atemwiderstandsmessungen ausgeführt. Dabei wurde am Anfang jeder Versuchsreihe die Atemwechseldruckkurve ohne jede große äussere Reizung (Behandlung) registriert. Die dadurch gewonnenen Werte, kurz Normalatmungswerte genannt, wurden als Ausgangswerte für die weiteren Meßergebnisse unter thermischer Reizung, körperlicher Austrennung und Nikotineinfluss angenommen.

MESSERGEBNISSE DES ATEMWEGSWIDERSTANDES

Tabelle (1) Atemwegswiderstand (AW). Einzelwerte pro Person und Spezialbehandlung

A.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10. Person
NA	1,10	0,93	0,55	0,45	0,76	0,85	0,70	0,52	0,68	1,10
WD	1,70	0,88	0,61	0,54	0,51	0,48	0,75	0,56	0,59	1,40
KD	2,05	0,74	0,70	0,43	0,63	0,36	0,41	0,64	0,64	0,55
KS	5,00	0,99	0,67	1,05	0,81	0,39	0,51	0,77	1,02	1,00
AS	1,24	0,63	0,39	0,36	0,35	0,31	0,28	0,71	0,70	0,56
RA	2,30	1,15	-	0,71	-	0,36	-	0,85	1,45	1,35
B.										
NA	1,80	1,05	0,65	0,74	0,51	0,62	0,54	0,79	2,60	0,85
WD	1,17	1,11	0,60	0,89	0,76	0,55	0,52	0,56	1,09	1,35
KD	1,18	1,00	0,66	0,52	0,84	0,51	0,71	0,56	4,10	0,72
KS	2,86	1,35	0,59	0,24	0,53	0,53	0,41	0,69	1,85	0,86
AS	0,77	0,43	0,41	0,32	0,33	0,29	0,47	0,40	0,77	0,68
RA	3,66	1,10	-	0,70	-	0,67	-	0,93	0,91	1,05
C.										
NA	2,25	1,23	0,64	0,77	1,45	0,77	0,51	0,58	2,30	1,45
WD	1,35	2,35	0,51	0,82	0,72	0,58	0,65	0,71	2,30	1,40
KD	3,30	0,83	0,50	0,22	0,30	0,31	0,36	0,81	0,62	0,93
KS	1,10	1,65	0,80	0,58	0,77	0,53	0,43	1,00	6,50	0,79
AS	3,00	0,63	0,32	0,35	0,64	0,29	0,35	0,85	0,61	0,61
RA	1,22	0,89	-	1,24	-	0,51	-	0,99	3,10	1,20

Gemessen in $\frac{\text{mm H}_2\text{O}}{\text{l/min.}}$

A.: = 1. Serie; B. = 2. Serie; C. = 3. Serie

NA = Normalatmung ohne äußeren Reiz

WD = warme Dusche

KD = kalte Dusche

KS = kalter Schock

AS = körperliche Anstrengung

RA = Rauchen einer Filterzigarette.

Die Mittelwerte, errechnet aus den Ergebnissen der zehn Versuchspersonen, ergaben für die Atemwegswiderstände folgende Werte:

Normal-Atmung	NA	0,978	$\frac{\text{mm H}_2\text{O}}{\text{Liter/min}}$
warme Dusche	WD	0,913	"
kalte Dusche	KD	0,883	"
kalter Schock	KS	1,209	"
körperliche Anstrengung	AS	0,602	"
Rauchen	RA	1,265	"

MESSERGEBNISSE DER ATEMFREQUENZ

Atemfrequenz (AF) = Atemaktion/min.

Tabelle 2:

		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	Pers.
A.	NA	22	19	16	16	18	26	26	14	12	14	
	WD	22	19	14	20	18	14	33	14	15	18	
	KD	21	20	14	24	20	15	30	16	28	25	
	KS	18	19	13	20	26	16	26	17	18	17	
	AS	22	21	16	25	26	13	22	20	18	28	
	RA	21	20	-	23	-	13	-	19	14	24	
B.	NA	19	20	14	18	20	14	23	20	13	15	
	WD	20	19	41	21	23	16	30	13	17	20	
	KD	20	18	16	26	26	20	30	20	18	25	
	KS	20	20	16	30	26	15	23	20	19	26	
	AS	20	22	21	30	35	13	20	14	18	20	
	RA	22	17	-	25	-	11	-	14	14	16	
C.	NA	21	16	16	20	20	12	20	16		15	
	WD	20	16	15	21	22	13	25	14	17	18	
	KD	26	17	20	35	37	19	27	14	28	27	
	KS	22	16	16	23	22	13	23	14	17	14	
	AS	22	21	21	25	23	11	22	14	18	28	
	RA	21	17	-	28	-	14	-	11	15	16	

Die aus den Einzelwerten der Tabelle 2 errechneten Mittelwerte ergaben folgende Resultate für die Atemfrequenz/min.

Mittelwerte für die Atemfrequenz:

Normal-Atmung	NA	17,6	Atemaktionen/min
warme Dusche	WD	19,6	" "
kalte Dusche	KD	22,7	" "
Anstrengung	AS	21,2	" "
kalter Schock	KS	19,5	" "
Rauchen	RA	18,3	" "

MESSERGEBNISSE FÜR DAS ATEMVOLUMEN

Tabelle 3 Atemvolumen (AV), gemessen in Noniuseinheiten.

		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10. Pers.
A.	NA	0,5	1,2	1,1	0,9	1,6	1,7	0,9	0,4	0,6	0,6
	WD	0,5	1,1	2,7	1,5	0,9	2,0	0,74	0,7	0,5	1,2
	KD	0,4	1,6	2,2	1,0	1,7	1,6	0,63	0,9	0,4	0,8
	KS	0,3	0,7	1,4	0,5	0,6	1,1	1,4	1,0	1,2	0,5
	AN	0,5	1,1	1,7	1,3	1,4	2,0	1,0	2,2	0,5	0,9
	RA	-0,35	1,0	-	0,5	-	1,0	-	2,0	-	0,5
B.	NA	0,33	0,55	0,5	1,7	0,6	0,7	0,23	0,5	0,5	0,7
	KD	0,6	1,0	1,0	0,8	0,7	0,9	0,5	1,2	0,6	0,7
	WD	0,86	1,8	1,1	0,7	0,7	0,7	0,4	0,6	0,4	0,6
	AN	0,77	0,68	0,9	1,0	1,0	1,65	0,71	0,9	1,0	0,7
	KS	1,1	2,0	0,5	0,7	0,8	0,9	0,71	1,1	0,7	0,5
	RA	0,55	0,73	-	0,8	-	0,23	-	1,3	0,6	0,7
C.	NA	0,46	0,6	0,5	0,7	0,7	1,1	1,0	1,2	0,5	0,5
	KS	0,31	0,6	0,6	0,5	0,5	1,3	1,1	1,0	0,4	0,5
	WD	0,31	0,5	0,4	0,7	0,6	1,0	0,6	1,1	0,4	0,4
	AN	0,94	0,8	1,1	1,1	1,3	2,2	0,91	0,8	1,0	0,7
	KD	0,61	0,76	1,1	1,0	1,7	1,7	1,3	1,4	0,7	0,7
	RA	0,51	0,5	-	0,55	-	1,1	-	0,5	0,5	0,6

Aus Tabelle 3 für das Atemvolumen aller Versuchspersonen während aller Behandlungen ergaben sich folgende Mittelwerte für die einzelnen Behandlungen:

Mittelwerte für das Atemvolumen (in Noniuseinheiten):

Normal-Atmung	NA	0,76 (Noniuseinheiten)	
warne Dusche	WD	0,87	"
kalte Dusche	KD	1,00	"
kalter Schock	KS	0,82	"
Anstrengung	AS	1,05	"
Rauchen	RA	0,75	"

VI. Besprechung der Versuchsergebnisse

Die Atemwegwiderstandsmessung bei den zehn Versuchspersonen zeigte bei unbeeinflusster Registrierung des Atemwegwiderstandes Werte von $0,45 \frac{\text{mm H}_2\text{O}}{\text{ltr}/\text{min}}$ bis $2,60 \frac{\text{mm H}_2\text{O}}{\text{ltr}/\text{min}}$

Der Durchschnittswert des Atemwegwiderstandes (AWW) für alle zehn Versuchspersonen ergab $0,978 \frac{\text{mm H}_2\text{O}}{\text{ltr}/\text{min}}$.

Schneider (21) fand nach der Wechseldruckmethode von Dirnagl AWW bei gesunden Personen um $1,40 \frac{\text{mm H}_2\text{O}}{\text{ltr}/\text{min}}$.

Auffallend hoch waren die AWW bei der Versuchsperson Nr. 9 in den Versuchsreihen B und C, was in Richtung einer Prädisposition für Asthma bronchiale gewertet werden könnte; jedoch ist weder in der Familien- noch Eigenanamnese eine Belastung für Asthma bronchiale bekannt gewesen. Vielleicht könnte eine über viele Jahre angelegte Versuchsreihe darüber Aufschluß geben.

Die Versuchsreihen A, B und C zeigen keine abweichenden Ergebnisse untereinander, sodaß mit Sicherheit die Reihenfolge der Einzelbehandlungen (Normalatmung, kalte und warme Dusche usw.) die Meßwerte nicht beeinflußt haben. Der psychische Einfluß von Erwartungsangst oder Neugier, der bei der Versuchsreihe A zu erwarten war, konnte nicht gegenüber den Versuchsreihen B und C festgestellt werden; der wiederholt eingeschaltete künstliche Atemwiderstand (Siebwiderstand des Gerätes) während der Atemaktion wurde von den Versuchspersonen kaum, und wenn, nicht als unangenehm und störend empfunden.

Zum Vergleich aller gewonnenen Mittelwerte wurden diese in der Tabelle 4 zusammengestellt.

Mittelwertmatrix: (Tabelle 4)

	AWW	AF	EM	IM	AV	DE	DI
NA	0,978	17,6	2,40	1,40	0,76	245,2	265,2
WD	0,913	19,6	1,77	1,27	1,20	228,7	255,2
KD	0,883	22,7	1,97	1,77	1,00	195,8	223,1
KS	1,209	21,2	2,10	1,40	0,82	215,6	241,8
AN	0,602	19,5	1,90	1,50	1,05	203,4	213,7
RA	1,265	18,3	1,80	1,30	0,73	290,1	316,2

AWW = Atemwegswiderstand $\frac{\text{mm H}_2\text{O}}{\text{ltr/min}}$

AF = Atemfrequenz/min

EM = Expirationsmaximum (Lage im Kurvenverlauf)

IM = Inspirationsmaximum (Lage im Kurvenverlauf)

AV = Atemvolumen (Noniuseinheiten)

DE = Dauer der Expiration (sec)

DI = Dauer der Inspiration (sec)

NA = Normal-Atmung

WD = warme Dusche

KD = kalte Dusche

KS = Kälte-Schock

AN = körperliche Anstrengung

RA = Rauchen einer Filterzigarette.

Wie aus der Tabelle 4 für die Mittelwerte ersichtlich ist, erhöht sich der Atemwegswiderstand gegenüber dem Normwert (Normalatmung) $0,978 \frac{\text{mm H}_2\text{O}}{\text{ltr/min}}$ bei Kälte-Schock auf $1,209 \frac{\text{mm H}_2\text{O}}{\text{ltr/min}}$ beim Rauchen einer Filterzigarette auf $1,265 \frac{\text{mm H}_2\text{O}}{\text{ltr/min}}$.

Einfluß der Einzelbehandlung auf die Atemmeßwerte:

Normale Atmung (NA). Die Meßwerte der "Normalen Atmung" wurden als Ausgangswerte für die übrigen Ergebnisse unter thermischer Reizung, körperlicher Anstrengung und Rauchen einer Zigarette angenommen. Die Versuchsreihe "Normal-Atmung" wurde wie die folgenden Versuchsreihen im Stehen ausgeführt, wobei darauf geachtet wurde, daß sich die Versuchspersonen vor jedem Versuchsbeginn etwa zehn Minuten ausruhten. Wie aus den Tabellen für die Einzelwerte ersichtlich, ergaben sich für die Atemwegswiderstände Werte von $0,45 \frac{\text{mm H}_2\text{O}}{\text{ltr/min}}$ bis $1,80 \frac{\text{mm H}_2\text{O}}{\text{ltr/min}}$

(von einigen extremen Streuwerten bei Versuchsperson neun abgesehen). Der Mittelwert aus allen Einzelwerten entspricht damit der Größe von $0,978 \frac{\text{mm H}_2\text{O}}{\text{ltr/min}}$;

Die meisten Werte liegen zwischen $0,5$ und $0,9 \frac{\text{mm H}_2\text{O}}{\text{ltr/min}}$.

Diese Ergebnisse stimmen überein mit den Werten, die Schneider (21) ermittelte. Schneider fand Werte mit der Wechseldruckmethode bei Gesunden bis $1,40 \frac{\text{mm H}_2\text{O}}{\text{ltr/min}}$.

Piiper und Schnermeyer sprechen von einem mittleren Bereich von $0,3 - 0,8 \frac{\text{mm H}_2\text{O}}{\text{ltr/min}}$; Wess gab einen Mittelwert von $0,57 \frac{\text{mm H}_2\text{O}}{\text{ltr/min}}$

an. Die Schwankung in den Angaben wird durch die Verwendung verschiedener Apparate, sowie durch die unterschiedlichen Versuchsbedingungen hervorgerufen.

Die Atemfrequenz in Ruhe ergab Werte von $12 - 21$ Atemzüge/min, was einem Mittelwert von $17,6$ Atemzüge/min entspricht. Schneider und Bornhaupt ermittelten eine Atemfrequenz von $12,6$ Az/min. Dieser Wert wurde aber während einer Ruhepause von 30 Minuten ermittelt. Da aber in dieser Arbeit alle Versuche im Stehen durchgeführt werden mußten, würde ein vollkommener Ruhewert die übrigen Ergebnisse in einem falschen Verhältnis erscheinen lassen.

Die Maximalpunkte für Ex- wie Inspiration zeigen eine leichte Verschiebung bei der Expiration zur Mitte der Atemkurve hin. Im Gegensatz zum Maximalpunkt bei der Inspiration, deren Durchschnittswert knapp nach dem ersten Viertel der Inspirationskurve liegt. Comroe (4) fand, daß zu Beginn der Expiration bei Gesunden der Atemstrom sehr hoch liegt (400 ml/min), anschließend aber immer mehr bis zum Ende der Atemkurve abfällt. Bei der Expiration zeigt sich bei allen Behandlungen leichte Verschiebung der Atemstrommaximalpunkte zum Beginn der Atemkurve hin. Besonders unter den Behandlungen "Rauchen" und "warme Dusche" trat dieser Effekt auf. Die Inspirationsmaximalpunkte der Atemstromstärke werden durch dieselben Behandlungen wie "Rauchen" und "warme Dusche" mehr an den Anfang der Atemkurve verlegt, während die übrigen Behandlungen eine unwesentliche Verschiebung des Maximalpunktes zur Kurvenmitte aufzeigen.

Das Atemvolumen weist Werte von 0,4 - 1,6 (Noniuseinheiten) auf. Da bei besonders großen Atemvolumen bei einigen Versuchspersonen die Sensibilität des Registriergerätes herabgesetzt werden mußte, ist der Atemvolumenmittelwert ohne Aussagekraft.

Die Expirations- und Inspirationsdauer zeigt parallel zur Frequenzerhöhung eine Verkürzung der Atemaktion, wobei am stärksten die Inspiration betroffen ist. Das ist dadurch zu erklären, daß die Inspiration ein aktiver Vorgang ist, der wohl am besten beeinflußt werden kann. Für die Expirationsdauer wurde ein Mittelwert von 2,45 cm gemessen, wobei 1,5 cm auf der Nulllinie der Atemkurve einer Zeitspanne von 1 sec entsprechen. Für die Inspiration wurde ein Mittelwert von 2,65 cm ermittelt.

Bei der Darstellung der Häufigkeitsverteilung der Einzelbeobachtungen wurde festgestellt, daß die Meßwerte sämtlicher Meßgrößen nicht normal verteilt sind. Deshalb wurde zunächst die Frage nach Unterschieden zwischen den Meßwerten vor den Behandlungen und den angegebenen Behandlungen mit Hilfe eines nichtparametrischen Testes (Friedmann-Test) geprüft. Dabei

existiert für jede Meßgröße ein p-Wert, der angibt, mit welcher Irrtumswahrscheinlichkeit Unterschiede bestehen. Die gleiche Frage wurde mit dem Friedmann-Test bei den sechs männlichen und vier weiblichen Versuchspersonen geprüft. Daraus ergab sich, daß Unterschiede zwischen männlichen und weiblichen Personen nicht zu erkennen sind. Weiterhin wurde geprüft, welche Meßgrößen bei den einzelnen Behandlungen verändert wurden, die Auswertung sollte mit einem parametrischen Test ausgeführt werden, dazu mußten die Meßwerte in eine angenäherte Normalverteilung transformiert werden. Es wurde jeweils der Logarithmus der einzelnen Meßwerte verglichen. Zu diesem Vergleich wurden die Paardifferenzen, zwischen Logarithmus-"behandelt" und Logarithmus-"unbehandelt" gebildet und mit Hilfe des t-Testes nach Fisher geprüft, ob eine Abweichung vom Erwartungswert Null vorliegt. Dazu wurden Paardifferenzen sämtlicher zehn Personen einschließlich der Wiederholungsmessungen gebildet. Die Berechnung des t-Testes wurde auf einem Computer ausgeführt mit dem Rechenprogramm BMDX 70T von der Health Sciences Computing Facility, UCLA. Dabei wurde sofort als Endergebnis die Irrtumswahrscheinlichkeiten auf Grund der errechneten t-Werte nach der F-Verteilung ausgegeben. Die Irrtumswahrscheinlichkeit p wurde nach folgender Matrix tabelliert:

Matrix für Irrtumswahrscheinlichkeit p.

	AW	AF	EM	IM	AV	DE	DI
WD	0,458	<u>0,080</u>	0,148	0,287	0,415	<u>0,073</u>	<u>0,022</u>
KD	<u>0,016</u>	<u>0,000</u>	0,863	<u>0,021</u>	<u>0,001</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>
KS	0,948	<u>0,018</u>	0,796	0,864	0,479	<u>0,016</u>	<u>0,006</u>
AN	<u>0,000</u>	<u>0,004</u>	0,216	0,147	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>
BA	0,431	0,500	0,175	0,459	0,612	0,470	0,136

AW = Atemwegswiderstand (Tabelle 5)
 AF = Atemfrequenz
 EM = Expirationsmaximum
 IM = Inspirationsmaximum

AV = Atemvolumen
 DE = Dauer der Expiration
 DI = Dauer der Inspiration
 WD = warme Dusche
 KD = kalte Dusche
 KS = Kälteschock
 AN = Anstrengung
 RA = Rauchen

Für die Aussage, daß gesicherte Unterschiede bestehen zwischen den Atemwerten "unbehandelt" und "behandelt", wurde eine Signifikanzschranke für $p = 0,05$ (durchgehend unterstrichene Werte in der Matrix) angenommen. Für die Aussage, daß wahrscheinliche Unterschiede durch die Behandlung verursacht wurden, wurde eine Signifikanzschranke von $0,1 > p > 0,05$ gewählt (gestrichelte unterstrichene Werte in den Tabellen 5, 6 und 7).

Wie die Tabelle 5 zeigt, ergeben sich deutliche Unterschiede durch die Behandlungen. Die auffälligste Wirkung zeigten die Behandlungen "Kalte Dusche" und "Anstrengung".

Um das Verhältnis der Normal-Atmungswerte zu den jeweiligen speziellen Behandlungswerten zu bekommen, wurde der Logarithmus der Paarquotienten aus den Mittelwerten errechnet.

Matrix des Logarithmus der Paarquotienten aus den Mittelwerten
 (Tabelle 6)

	AW	AF	EM	IM	AV	DE	DI
WD	-0,0487	<u>0,0910</u>	-0,1383	-0,0690	0,0600	-0,0693	-0,0827
KD	<u>-0,2530</u>	<u>0,2350</u>	-0,0177	0,2020	<u>0,2940</u>	-0,2340	-0,2453
KS	0,0067	<u>0,1003</u>	-0,2267	0,0137	0,0607	-0,1253	-0,1530
AN	<u>-0,5413</u>	<u>0,1747</u>	-0,1097	0,1150	<u>0,3973</u>	-0,1913	-0,2630
RA	0,0895	0,0429	-0,1648	-0,0852	-0,0738	-0,0386	-0,0724

Aus Tabelle 6 ergibt sich durch Delogarithmieren die mittleren prozentuellen Änderung des Ausgangswertes (= Normalatmungswertes = 100 %) durch die jeweilige spezielle Behandlung.

Matrix der mittleren prozentuellen Änderung des Ausgangs-
wertes (= 100 %) durch die jeweilige spezielle Behandlung:

(Tabelle 7)

	AW	AF	EM	IM	AV	DE	DI
WD	89,4	<u>123,3</u>	72,8	85,3	120,2	<u>85,3</u>	<u>82,7</u>
KD	<u>55,8</u>	<u>171,8</u>	96,0	159,2	<u>196,8</u>	<u>58,3</u>	<u>56,8</u>
KS	101,5	<u>126,0</u>	94,0	103,2	120,4	<u>74,9</u>	<u>70,3</u>
AN	<u>28,8</u>	<u>149,5</u>	77,7	130,3	<u>249,6</u>	<u>64,4</u>	<u>54,6</u>
RA	122,9	110,4	68,4	82,2	84,4	91,5	84,6

Alle Werte sind in Prozentzahlen ausgedrückt, wobei die Mittelwerte bei Normalatmung gleich 100 % gesetzt wird.

Wie aus den Tabellen 4, 5, 6 und 7 ersichtlich, wird der Atemwegswiderstand (AWW) mit großer Sicherheit durch die Behandlung kalte Dusche gesenkt. Bei den vorliegenden Versuchen entsprach der AWW-Mittelwert 55,8 % des AWW-Mittelwertes bei Normalatmung. Wahrscheinlich kommt diese Minderung des AWW durch einen Vagusreiz, der zu einer Bronchiendilatation führt, zustande. Da aber gleichzeitig bei "Kalter Dusche" eine Vergrößerung des Atemvolumens auf 196,8 festgestellt wurde, ist auch an eine rein mechanische Erweiterung der Atemwege zu denken, wie sie Comroe (3) beschrieben hat. Comroe konnte feststellen, daß der AWW mit Zunahme des Atemvolumens abnimmt, und zwar weist der AWW während der Inspiration kleinere Werte auf, als während der Expiration. Wahrscheinlich, weil der Zug, der von dem sich blähendem Lungengewebe ausgeht, die kleinen Bronchien etwas erweitert.

Parallel mit der Steigerung des Atemvolumens erhöht sich die Atemfrequenz auf 171,8 %, was den Aussagen von Schneider (und von Bornhaupt (22) entspricht. Die Dauer von Inspiration und Expiration wurde entsprechend der Atemfrequenzerhöhung verkürzt, wobei keine Unterschiede in der Veränderung der jeweiligen Größen untereinander errechnet werden konnten. Die Maximalpunkte der Expirations- wie Inspirationspunkte zeigen im gesamten Versuchsverlauf keine Beeinflussung.

Die Versuche mit "Kälteschock" erbrachten eine Atemfrequenzerhöhung von 26 % und damit gleichzeitig eine Verkürzung der Expirationsdauer um 25,1 %, bei der Inspiration eine Verkürzung um 29,7 %.

Daß ein deutlicher Zusammenhang zwischen AWW und Atemvolumen (AV) besteht, zeigt auch die Versuchsreihe "Anstrengung". Während der Mittelwert für den AWW auf 28,8 % der Norm gesenkt wird, steigen die Atemfrequenz auf 149,5 % und das Atemvolumen auf 249,6 % der Norm an. Gleichzeitig verkürzt sich die Zeit für die Expiration auf 64,4 %, die der Inspiration auf 54,6 %. Wie diese Steigerung des Atemminutenvolumens und die Senkung des AWW bei körperlicher Arbeit zustande kommt, ist noch nicht vollständig geklärt. Für CO_2 -Anreicherung im Gewebe und Blut konnten noch keine Beweise erbracht werden. (4) Wohl steigt bei CO_2 -Inhalation der arterielle $p \text{ CO}_2$ an und parallel dazu erhöht sich die Ventilation. Mißt man aber die Ventilation und den arteriellen $p \text{ CO}_2$ während einer körperlichen Tätigkeit, so stellt man fest, daß zwar die Ventilation um das Mehrfache gesteigert wird, der arterielle $p \text{ CO}_2$ aber unverändert bleibt. Im umgekehrten Sinne kann dasselbe für den $p \text{ O}_2$ gesagt werden.

Beim Rauchen einer Filterzigarette zeigte sich die einzige Atemwegswiderstandserhöhung. Comroe (4) fand bei denselben Versuchen eine Erhöhung des AWW um das 2-3 Fache des Ausgangswertes, die ungefähr 20-30 min bestehen blieb. Ein Unterschied zwischen Rauchern und Nichtrauchern soll nicht bestehen; auch soll der Nikotingehalt keinen Einfluß haben auf die AWW der Lunge. Vielmehr muß die AWW-Erhöhung eine Folge der Ablagerung submikroskopischer Partikel auf die Rezeptoren in den Atemwegen sein. Es handelt sich wahrscheinlich um einen Reflex der Hustenrezeptoren im Tracheobronchialbaum. Die Rezeptorenfasern verlaufen in den Vagi, die motorischen Nervenfasern (parasymphatische) endigen in den Bronchien und Bronchiolen.

Aus Tabelle 1 für den AWW zeigt sich, daß der Atemwegswiderstand durch Rauchen im Sinne einer Erhöhung auf den doppelten Ausgangswert verändert wird. Da die Meßwerte aber einer sehr erheblichen Schwankung unterworfen sind und die Versuchspersonen erst kurz vor dem Beginn der Versuche geraucht haben, erklärt sich die oft nur geringe AWW beim Rauchversuch. Der errechnete Gesamtmittelwert beläuft sich auf $1,265 \frac{\text{mm H}_2\text{O}}{\text{l/min}}$, was einer AWW-Erhöhung von 22,9 % entsprechen würde.

Die Atemfrequenz unter dem Rauchversuch wurde nur um 10,4 % erhöht, was bei dieser geringen Änderung keine Aussagekraft zugemessen werden darf. Die übrigen Atemwerte waren durch das Rauchen kaum beeinflusst.

VII. Zusammenfassung:

1. Die Aufgabe der vorliegenden Arbeit war es, zu untersuchen, wie warme und kalte Hautreize auf die Funktion der Atmung sich auswirken. Gleichzeitig wurde als Vergleich die Einflußnahme von körperlicher Anstrengung (Kniebeugen) und Rauchen einer Filterzigarette untersucht. Als Meßgrößen für die Atemfunktion wurden der Atemwegswiderstand, die Atemfrequenz, das Atemvolumen, die Inspirations- und Expirationsdauer sowie die Maximalpunkte in der Atemkurve ermittelt.
2. Die Versuche wurden an zehn gesunden Personen im Alter von 25 - 30 Jahren durchgeführt.
3. Die Atemmechanik wurde pneumotachographisch im offenen System unter Verwendung eines Gerätes nach der Wechseldruckmethode nach Dirnagl (5, 6) untersucht.
4. Zu Beginn der Arbeit wurde auf die Physiologie der Atemmechanik eingegangen und die Steuerung des Atemrhythmus besprochen. Anschließend wurde der Atemwegswiderstand beschrieben, sowie dessen Ermittlungsverfahren dargelegt.
5. Bei der statistischen Überprüfung der Meßwerte nach der Methode von Fisher ergaben sich gut bzw. sehr gut gesicherte Unterschiede zwischen den Werten "unbehandelt" und "behandelt" bei den folgenden Benennungen:
 - a) Kalte Dusche eine Erhöhung der Atemfrequenz um 71,8 %, des Atemvolumens um 96,8 %.
Gleichzeitig mit der Erhöhung von Atemfrequenz und des Atemvolumens erniedrigte sich der Widerstand der Atemwege um 44,2 %.

Der Effekt Erhöhung der Atemfrequenz und des Atemvolumens bei gleichzeitiger Minderung des AWW zeigten die Behandlungen "Warme Dusche", "Kalte Dusche" und "Anstrengung", wobei die beiden letzten Behandlungen den größten Effekt zeigten.

b) Warme Dusche

zeigte eine geringe Erhöhung der Atemfrequenz um 23,3 % sowie des Atemvolumens um 20,2 %. Der Atemwegswiderstand wurde um 10,6 % erniedrigt.

c) Kälte-Schock

(durch Auflegen von Eispackungen auf die Nackenhaut im Bereich der Halswirbel $G_2 - G_5$)

Beim "Kälte-Schock" trat eine deutliche Atemfrequenzerhöhung von 26 % auf, das Atemvolumen vergrößerte sich um 20,4 %, während der AWW nur um 1,5 % geringfügig erhöht war.

d) Körperliche Anstrengung

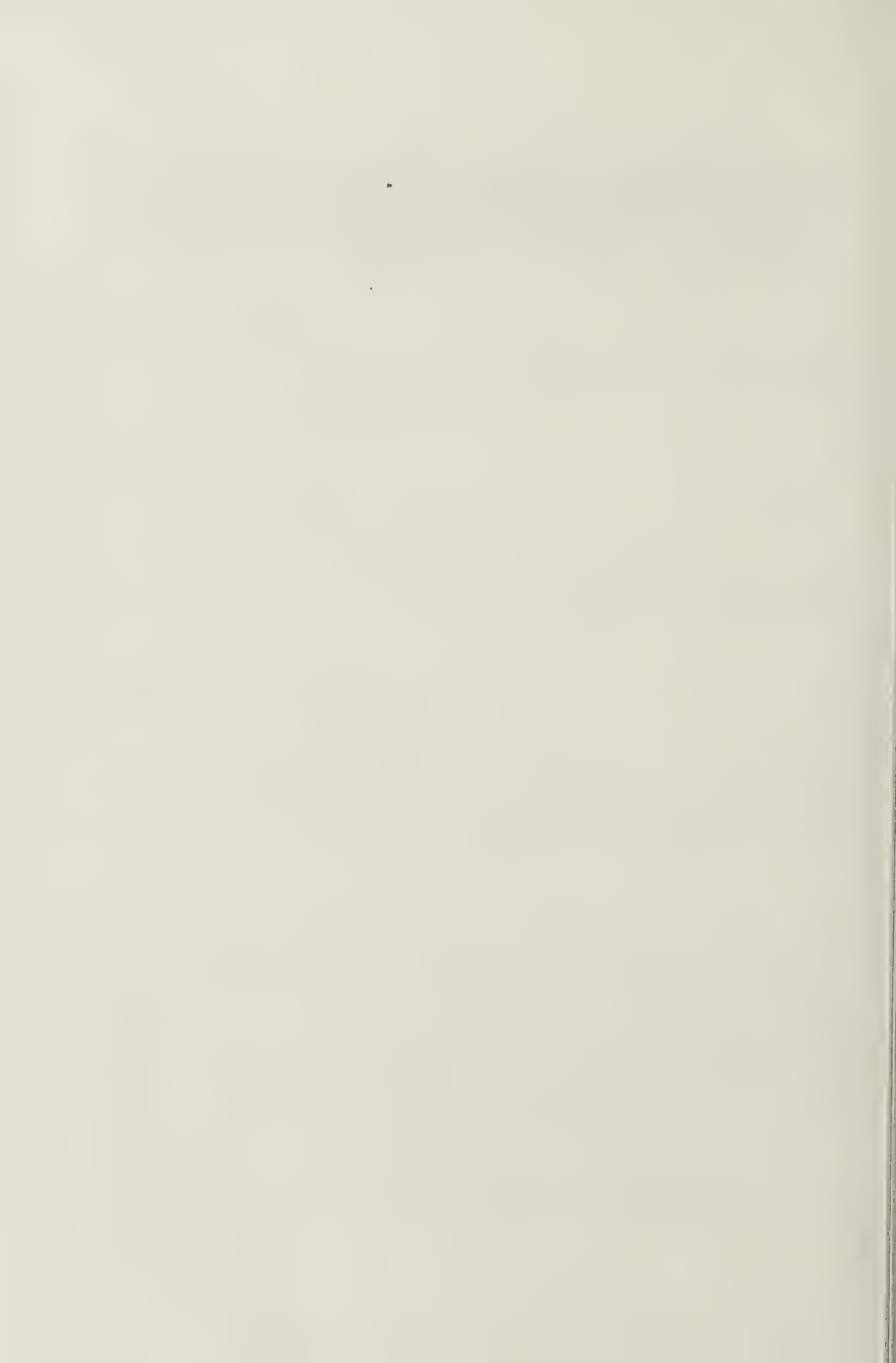
(15 - 20 Kniebeugen)

Der Einfluß der körperlichen Anstrengung war am deutlichsten statistisch gesichert. Bei dieser Behandlung zeigte sich eine Vergrößerung des Atemvolumens um 149,6 %, die Atemfrequenz war um 49,5 % beschleunigt und der Atemwegswiderstand um 71,2 % reduziert.

Auffallend ist das Ergebnis bei der Versuchsreihe Rauchen, da sich keine deutlichen Änderungen in den Atemmeßwerten durch diese Behandlung ergaben. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, daß sich nur die Hälfte der Personen dem Rauchversuch zur Verfügung stellten. Zweitens waren die fünf Personen starke Raucher, die sicher während des Versuches unter dem Einfluß vorher gerauchter Zigaretten standen.

Zusammenfassend darf gesagt werden, daß die warmen und kalten Reize auf die Haut eine deutliche Beeinflussung auf die Atemmechanik hervorrufen, wobei es zu einer mehr oder weniger

starken Verminderung des Atemwegswiderstandes kommt; gleichzeitig wird die Atemfrequenz und das Atemvolumen erhöht. Derselbe Effekt tritt im verstärkten Maße bei körperlicher Anstrengung auf.

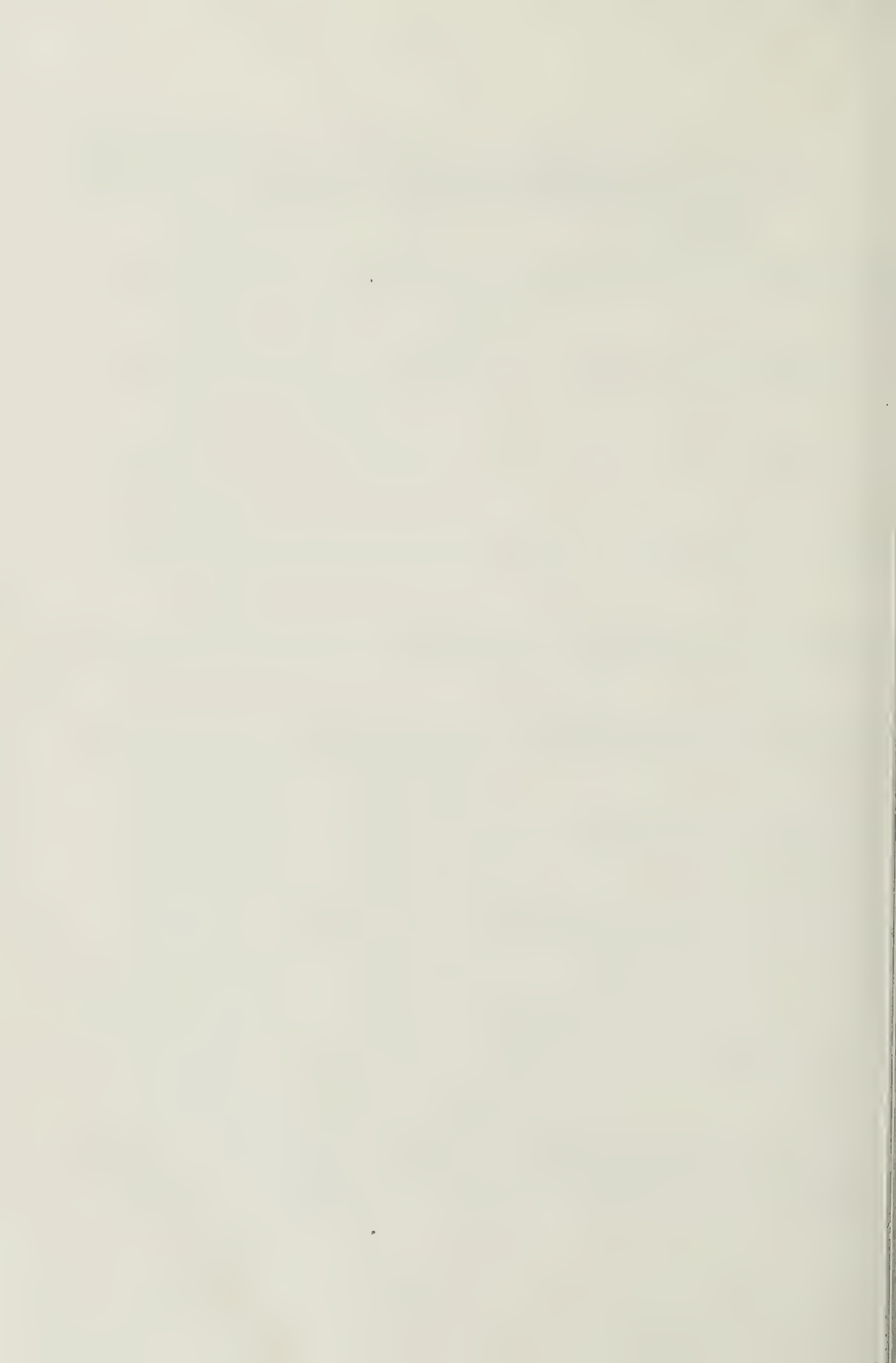


12. Landahl, H.D.: On the removal of airborne droplets by the human respiratory tract. The lung. Bull. Meth. Biophysics 12, 43 (1950)
13. Neergard, K.V. und Wirz, K.: Die Messung der Strömungswiderstände in den Atemwegen des Menschen, insbesondere bei Asthma und Emphysem. Zschr. f. klin. Med. 105; 106 - 112 (1948)
14. Neergard, K.V. und Wirz, K.: Über eine Methode zur Messung der Lungenelastizität am Menschen, insbesondere beim Emphysem. Zschr. f. klin. Med. 105; 35 - 51 (1927)
15. Pitts, R.F., H.W. Magoun, S.W. Ranson, Amer. J. Physiolog. 126, 673 (1939)
16. Pitts, R.F.: Organization of the respiratory-center Physiol. Rev. 26: 609 - 690 (1946)
17. Rohrer, F.: Physiologie der Atembewegung. Hdb. d. norm. u. path. Physiol. II, Berlin (1925)
18. Rohrer, F.: Der Strömungswiderstand in den menschlichen Atemwegen. Pflüger's Arch. f. d. ges. Physiol. 218, 698 - 707 (1927)
19. Marx, H.H.: Zur Problematik klinischer Funktionsprüfungen von Atmung und Kreislauf. Münch. med. Wschr. 50, (1968) 2909
20. Rossier, P.H., A. Bühlmann, K. Wiesinger; Physiologie und Pathophysiologie der Atmung. 2. Auflage Springer Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg (1958)
21. Schneider, W.: Vergleich zweier Meßmethoden zur Bestimmung des Strömungswiderstandes in den Atemwegen. Diss. München 1965
22. Schneider, W.; v. Bornhaupt, O.: Kneipp-Güsse und Atmung. Nach einem Vortrag zum 6. ärztl. Fortbildungskurs des Kneipp-ärztebundes e.V., Bad Wörishofen, Okt. 1954

LITERATURVERZEICHNIS

1. Bartels, H.E. Büchlerl. C.W. Hertl. G. Rodewald. M. Schwab: Lungenfunktionsprüfungen (Methoden und Beispiele klinischer Anwendung), Schattauer Verlag, Berlin - Heidelberg, 149 (1959)
2. Böhlau, V.: Erkrankungen der Schleimhäute des Respirationstraktes und ihre Beziehung zur Allergie. Med. Welt 26/69 1 475.
3. Comroe, J.H.: Die Lunge. F.K. Schattauer Verlag, Stuttgart - New York 25.
4. Comroe, J.H.: Physiologie der Atmung, F.K. Schattauer Verlag Stuttgart - New York
5. Dirnagl, K.: Zur fortlaufenden Messung des Atemwiderstandes Zschr. Aerosol. Forsch. 2, 4: 475 - 484 (1953)
6. Dirnagl, K.: Zur Messung des Strömungswiderstandes in den Atemwegen, Zschr. F. Aerosol - Forsch. und Therapie 2, (1957) Schattauer Verlag Stuttgart.
7. Fleisch A.: Neue Ergebnisse über Mechanik und Proprioceptive Steuerung der Atembewegung. Ergeon. Physiol. 36, 244 (1934)
8. Fleisch, A.: Die Pneumotachographie. Hdb. d. biol. Arb. Meth V, 8, 845 - 859 Verl. Urban u. Schwarzenberg, Berlin (1935)
9. Fleisch, A.: Das Pneumotachogramm. Ergebn. Physiol. 36, 278 (1934)
10. Haslreiter, E.: Die Pneumotachographie. Zschr. für Aerosol-Forschung und Therapie 8, 35 - 52 (1959)
11. Hering, E., J. Breuer: Die Selbststeuerung der Atmung durch den Nervus vagus. Akad. Wiss. Wien Math. naturw, kl. 57: 672, 58: 58. 909 (1868)

23. Vuilleumier, P.: Über eine Methode zur Messung des intra-alveolaren Druckes und der Strömungswiderstände in den Atemwegen des Menschen. Zschr. f. klin. Med. 143, 698 - 717 (1944)



Lebenslauf

Am 25.2.1940 wurde ich, Elmar Gerhard Kerscher als Sohn des praktischen Arztes Dr. med. Josef Kerscher und Frau Anna, geb. Fraunholz, in Eggenfelden geboren.

Von 1946 bis 1951 besuchte ich die Volksschule in Eggenfelden, von 1952 bis 1955 war ich Schüler des Humanistischen Gymnasiums in Passau, 1961 legte ich am Realgymnasium in Ising/Chiemsee die Reifeprüfung ab. Im Wintersemester 1961/62 immatrikulierte ich mich an der Medizinischen Fakultät der Maximilians-Universität zu München und legte dort im Sommersemester 1968 das Medizinische Staatsexamen ab.

Der experimentelle Charakter und die Thematik veranlaßten mich, meine Dissertationsarbeit am Balneologischen Institut der Ludwig-Maximilians-Universität zu München durchzuführen.

